극자외선 간섭을 이용한 패터닝

DOI: 10.3938/PhIT.20.002

강현철·이수용·김재명·노도영

EUV Interferometric Lithography

H. C. KANG, S. Y. LEE, J. KIM and D. Y. NOH

Interferometric lithography is a well-known methodology to fabricate the periodic nano-scale structures such as nano-wires and nano-dots. It has also been widely studied by using extreme-ultraviolet light source because this approach might be able to characterize the light source, optics, and photo-resist to be used for the next generation projection lithography. Typically, the incident beam into the periodic grating diffracts and interferes at the downstream imaging position. These interference fringes, i.e. sinusoidal profiles, can be patterned on the photo-resist. In this paper, the basic concept of interferometric lithography is described. In addition, the Lloyd's mirror interferometric lithography technique and de-magnifying patterning with Fresnel zone plate are introduced.

들어가는 글

나노 패터닝 기술의 발달과 더불어 전자소자의 집적도가 매우 빠르게 향상되고 있다. 2008년에는 38 nm 선폭을 가지는

저자약력

강현철 교수는 광주과학기술원에서 공학박사(2003)를 받고 Argonne National Laboratory에서 Multilayer Laue Lens 개발 프로젝트를 주도하였으며, 고등광기술연구소 선임연구원을 거쳐 2008년부터 조선대학교 신소재 공학과 조교수로 재직 중이다. (kanghc@chosun.ac.kr)

이수용은 광주과학기술원 신소재공학부에서 박사과정에 재학 중이다. 현재 노도영 교수 연구실에서 경 X-선 나노 패터닝 관련 연구를 수행하고 있다. (dsleesy@gist.ac.kr)

김재명은 광주과학기술원 신소재공학부에서 박사과정에 재학 중이다. 현재 노도영 교수 연구실에서 경 X-선 나노 패터닝 관련 연구를 수행하고 있다. (kjmasy@gist.ac.kr)

노도영 교수 약력은 13쪽 참조.

IC chip이 양산되었으며, 2010년 이후에는 30 nm 선폭의 소자들이 양산되고 있다. 현재 광학적 리소그래피에 사용되고 있는 광원은 193 nm의 파장의 ArF 레이저이다. Rayleigh 가설에 의하면 광학적 리소그래피는 ArF 레이저 광원의 파장 한계를 극복하기 어려울 것으로 예측된다. 따라서 새로운 광원이 필요하게 되었는데, 대표적으로 13.4 nm의 파장을 가지는 Extreme-Ultraviolet(EUV, 극자외선)이다. 이러한 극자외선 광원을 이용할 경우, 2012년에는 24 nm의 선폭을, 2014년에는 19 nm의 선폭을 가지는 전자소자를 제작할 수 있을 것으로 전망된다. 현재까지는 방사광가속기에서 발생한 13.4 nm 파장의 광원을 이용하여 다양한 리소그래피 기술이 개발되고 있다. 또 다른 대안으로 떠오르는 광원이 바로 실험실 규모의 레이저를 이용하여 발생시킨 극자외선 레이저이다. 극자외선 레이저는 결맞음성이 매우 우수하고 펄스당 photon(광자)의 수, 즉 휘도 또한 방사광 가속기를 이용하여 발생한 극자외선에 비해 손색이 없다. 극자외선을 이용한 나노 패터닝 기술은 마스크를 이용하여 감광제를 직접 감광시키는 proximity 패터닝 기술과 다양한 반사 거울 광학계를 적용한 projection 리소그래피 기술이 있다. 본 특집호에서는 그 중에서 극자외선 간섭 현상을 이용한 패터닝 기술 개발 동향을 소개하고자 한다.

간섭 현상을 이용한 패터닝

간섭현상을 이용한 패터닝은 grating 광학계를 이용하여 나노 선이나 나노점을 제작하는데 간단하게 이용할 수 있는 기법이다. 이 기술은 그림[Fig. 1]에서 보는 바와 같이 잘 정렬된 periodic grating을 이용하여 각각의 grating에서 회절된 빔이 초점에서 서로 간섭하여 간섭 무늬를 나타내게 되는데, 이때 초점에 감광제를 위치하게 되면 grating에 의한 간섭무늬를 감광제에 패터닝할 수 있다. 두 개의 grating을 서로 마주보게 위치하게 되면 일차원적 규칙적인 나노선을 제작할 수 있고, 네 개의 grating을 이용하여 간섭계로 활용하게 되면 균일한 나노점을 제작할 수 있다. 예를 들어 그림[Fig. 1]에서와 같이 two-beam의 경우에는

Fig. 1. Schematic illustration of interferometric lithography. The diffraction gratings are illuminated by a light source such as EUV and soft x-ray, and the diffracted beams interfere each other. The beams produce the 1st and 2nd order interference patterns.^[1]

간섭이 일어나는 first order 초점에서는 d 의 주기를 갖는 파형이 만들어지는데, 이때 d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = \lambda / 2 \sin \theta$$

여기에서 λ 는 사용된 광원의 파장이고, θ 는 회절각이다. 위 식에서와 같이 간섭현상을 이용한 패터닝에서 가장 중요한 요소는 바로 사용되는 광원의 파장이다. 따라서 기존에 사용하던 193 nm 파장을 갖는 ArF 레이저 대신 13.4 nm의 파장을 가지는 극자외선 광원을 개발하려는 노력이 진행 중이다. 패터닝의 분해능을 결정하는 또 다른 요소는 coherence(결맞음성), polarization, 감광제의 민감도 등이 있다. Coherence 측면에서 보면 ArF 레이저는 거의 100%에 달하는 공간 결맞음성을 갖고 있기 때문에 넓고 균일한 영역의 패터닝 결과들이 보고되어 있다. 하지만 방사광가속기에서 발생하는 극자외선 혹은 연엑스선은 결맞음을 갖는 광원의 크기가 시료에서 제한적이므로 grating의 노출부위가 작아져야 하는 단점이 있다.

간섭현상을 이용한 패터닝 기술의 가장 큰 장점은 바로 grating의 선포이 간섭 현상에 의하여 두 배 혹은 네 배로 감소된다는 것이다. 즉 고분해능 패터닝이 가능하다. 그림[Fig. 1]에서 보는 바와 같이, 간섭계인 grating의 주기가 110 nm이었다고 하면, 1st order 초점에서는 주기가 2배로 줄어서 55 nm의 패터닝이 가능하고, 2nd order 초점에서는 주기가 4배로 줄어서 27.5 nm의 패터닝이 가능하다. 한 가지 단점은 패터닝할 수 있는 영역이 간섭계 grating의 영역보다 훨씬 더 작아진다는 점이다. 따라서 간섭계인 grating을 크게 제작하는 것이 필요하다.

극자외선을 광원으로 활용한 간섭 패터닝 기술은 비교적 저렴한 광학계(grating)를 사용하고 또한 고분해능 패터닝이 가능한 기법이므로 stepper 등을 적용한 projection 리소그래피 기술 개

발에 필수적인 감광제 성능을 평가하는데 주로 이용되고 있다. 또한 넓은 영역의 나노선이나 나노점을 제조하여 금속, 반도체 저장원 구조체의 저장원 물성을 연구하는데 널리 사용되고 있다.

극자외선 광원 개발

비록 전통적인 포토 리소그래피에 사용되던 ArF 레이저 광원이 관련 기술 개발과 더불어 반도체 소자 제작에 큰 진전을 보이기는 하였으나, 한계가 점진적으로 예측됨에 따라 삼성전자, Intel 등 반도체 회사를 중심으로 2000년대 초반부터 차세대 광원 개발에 초점이 맞춰져 왔다. 단파장 영역의 광원으로 여러 가지 파장 영역들이 고려되었는데, 그 중 13.4 nm의 파장을 갖는 극자외선이 많은 연구자들 사이에서 가장 주목할 만한 에너지 영역으로 선택되었다. 그 이유는, 이론적으로 거울 등 광학계의 반사율을 70 % 이상으로 최적화할 수 있을 뿐만 아니라 방사광가속기를 활용하여 광원을 보다 쉽게 개발할 수 있었기 때문이었다. 현재 미국의 Advanced Light Source(ALS)를 중심으로 개발되고 있는 projection 기반 리소그래피 기술에는 4개 혹은 5개의 mirror를 장착하고, stepper 등을 장착하여 기존에 사용하던 포토 리소그래피 기술을 그대로 적용할 수 있도록 설계되어 있다. 이때 사용되는 거울은 통상적으로 다층박막을 증착하여 사용하는데, 이때 가장 중요한 것이 bandwidth와 반사율이다. 다층 박막 물질로는 Mo/Si이 대표적으로 13.4 nm의 파장영역에서 0.56 nm의 bandwidth와 68% 이상의 반사율이 갖는 것이 보고되고 있다.^[2] 이때 Mo/Si 다층박막의 주기는 6.7 nm이고, 주기에 따라 허용되는 광원의 파장이 달라진다. 수백 혹은 수천 층의 다층박막을 결합 영역 없이 증착해야 되기 때문에 통상적으로 DC sputtering 기법으로 증착이 이루어진다. 또한 projection 리소그래피에 사용하기 위해서는 거울의 지름이 광원의 크기를 충분히 허용할 수 있을 정도로 커야 하기 때문에(수 센티미터 ~ 수십 센티미터) 큰 기판에 균일하게 다층박막을 증착하는 것은 고도의 증착기술이 요구된다.

방사광가속기 기반의 극자외선 광원은 자외선부터 경엑스선 영역까지 넓은 스펙트럼의 분포를 가지고 있기 때문에 광원의 파장 영역을 선택적으로 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 엑스선 발생장치에 비하여 수백만 배 이상의 휘도를 가지고 있기 때문에 리소그래피에 사용할 수 있을 정도의 광자 휘도를 가지고 있다. 또한 선평광이나 원편광을 선택할 수 있다. 한 가지 단점은 레이저 기반의 광원은 거의 100%에 육박하는

REFERENCES

- [1] *Handbook of Optics*, 3rd Ed. (2009), Volume V, Chapter 34.
- [2] D. Attwood, *Soft x-rays and extreme ultraviolet radiation* (2000), Chapter 10.

결맞음성을 가지고 있는데 반하여 방사광가속기에서 발생한 극자외선 혹은 연 엑스선 광원의 경우에는 결맞음성이 매우 결여되어 있다. 이를 보완하기 위하여 3세대 방사광 가속기에 기본적으로 장착되어 있는 휜자석 대신 undulator를 장착한 삼입장치 방사광원을 이용하여 결맞음성을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 광원의 휘도 또한 매우 향상시킬 수 있다. 하지만 삼입장치 광원의 경우에도 수직방향으로는 200 μm 정도, 수평방향으로는 20 ~ 50 μm 정도의 결맞는 영역이 가능하다.

방사광 가속기 기반의 극자외선 리소그래피 기술 개발은 미국의 ALS에서 주로 이루어지고 있다. 이 그룹은 미국의 유수의 반도체 회사를 비롯하여 Lawrence Livermore, Lawrence Berkeley, Sandia 국립 연구소가 주축이 되어 기술개발이 이루어지고 있으며, 최근 20 nm 이하의 패턴을 보고하기도 하였다.^[3]

극자외선 광원의 또 다른 대안으로 떠오르고 있는 것이 바로 실험실 규모의 레이저를 이용하여 발생시킨 극자외선 레이저이다. 국내에서는 광주과학기술원 고등광기술연구소를 중심으로 초고출력 레이저 시설이 갖추어져 있고, 여기에서는 은(Ag) 매질에 100 TW급 레이저를 조사하였을 때, 13.9 nm 파장을 갖는 극자외선 레이저 발생을 성공하였으며 최근 관련 연구를 수행하고 있다. 이때 발생된 극자외선 레이저는 방사광 기반의 광원과 달리 결맞음성이 매우 우수하고 펄스당 광자의 수, 즉 휘도 또한 방사광 가속기를 이용하여 발생한 극자외선에 비해 손색이 없다.(고등광기술연구소에서 발생에 성공한 13.9 nm 파장을 갖는 극자외선 레이저의 광자 수는 $\sim 10^{11}$ 광자/pulse이다.) 국내에서는 극자외선 레이저를 이용한 응용 연구가 아직 시작단계이기 때문에 구체적인 나노 패턴링 관련 성과는 나타나 있지 않지만 PW 레이저 시설을 활용한 물투과창(2 ~ 4 nm의 파장영역)까지 극자외선 레이저 개발이 확대될 경우 매우 중요한 연구성과가 도출될 것으로 기대된다.

Lloyd's Mirror Interferometric Lithography

레이저를 이용하여 발생시킨 극자외선 레이저의 나노 패턴링 응용 연구의 사례로 Lloyd mirror를 이용하여 극자외선 빔을 간섭시켜 나온 회절 무늬를 감광제에 전사하는 나노 패턴링 연구가 있다. 이 연구는 미국의 콜로라도 주립대학의 Rocca 교수팀에서 행해졌는데,^[5] Ne-like Ar table-top capillary discharge 레이저를 이용하여 발생한 46.9 nm의 파장을 갖는 극자외선 레이저를 이용하였다. 이때 발생된 극자외선 레이저는 1 mW의 power와 반경 570 μm 의 결맞는 영역을 갖는 것으로 보고되었다.

Lloyd mirror는 두 개의 다른 configuration을 갖는 평평한 mirror인데, 이 mirror에 조사된 극자외선 광원은 회절하

Fig. 2. Schematic configuration of lithography technique using Lloyd's mirror. Two-steps exposure can produce the nano-dots by rotating the sample by 90°.^[5]

Fig. 3. Patterns produced by Lloyd's mirror interferometric lithography. (a) hole patterns and (b) dot patterns. In (b), FWHM of single dot is 58 nm and period is 153 nm.^[5]

여 서로 다른 방향으로 진행한다. 이 두 빔이 만났을 때 간섭 현상을 일으켜서 간섭무늬가 나타난다. 이때 간섭무늬의 간격은 사용된 극자외선 파장, 입사 빔의 각도, 그리고 Lloyd mirror의 구성에 따라 달라진다. 이 연구에서는 나노 리소그래피의 해결해야 할 부분 중 하나인 감광제의 민감도 또한 실험하였는데, 기본적으로 PMMA를 이용하였으나 PMMA는 장시간 노출에 따른 감광 깊이나 분해능에 제한이 있음을 확인하였다. 이를 해결하기 위하여 HSQ(Hydrogen silsesquioxane) 감광제를 시험하였는데, PMMA보다 우수한 결과를 도출하였다. Table-top 극자외선 광원을 이용한 Lloyd mirror interferometry 결과로서, 가장 작은 크기는 60 nm의 크기를 갖는 원추형 나노점이다.

Lloyd mirror interferometry 기법 또한 방사광 광원을 이용하여 실증되었는데, Solak이 주도한 연구결과로서는 19 nm의 나노선을 제작하였다고 보고되었다.^[6] 이때 사용된 극자외선 광원의 파장은 13.4 nm이다. Lloyd mirror interferometry 기법의 분해능을 향상시키기 위해서는 기본적으로 파장이 짧은 광원이 필요하다. 연엑스선이나 경엑스선 영역의 파장은 mirror 표면에서 diffuse 산란이 일어나게 되어 간섭무늬가 불분명해지는 이차적인 요소로 작용하게 된다. 따라서 아직까지는 경엑스선 영역

REFERENCES

- [3] <http://www.cxro.lbl.gov/MET>.
- [4] http://apri.gist.ac.kr/sub04/sub_01.php
- [5] P. W. Wachulak *et al.*, Opto-Electronics Review **16**, 444 (2008).
- [6] H. H. Solak *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. B **17**, 3052 (1999).

Fig. 4. (a) Scheme of de-magnifying patterning using Fresnel zone plate. The object is patterned on the image plane with a de-magnification.^[7] (b) The array of 370 nm holes.

에서의 Lloyd mirror를 이용한 시도가 전무하다시피 하고 있다.

De-magnifying 패터닝

극자외선 광원을 이용한 나노 패터닝 기술 중 최근 연구되기 시작한 분야가 바로 Fresnel zone plate(FZP)를 이용한 패터닝 writer 개발 및 de-magnifying 패터닝 기술이다. 최근 e-beam 리소그래피 및 패터닝 기술 발전과 더불어 FZP를 제작하는 기술이 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 이러한 FZP는 대부분 phase contrast 엑스선 현미경에 장착되어 사용되고 있으며 현재 12 nm의 분해능을 갖는 이미징 기술이 개발되었다[연엑스선 영역].^[8] FZP는 그림[Fig. 4]에서 보는 바와 같이 투명 원뿔과 불투명 원뿔(Au)을 교차로 위치하게 하는데, 이때 원뿔의 간격은 Fresnel 법칙에 따라 동심원 안쪽에 위치한 원뿔의 넓은 간격을 가지고, 최외각 원뿔로 갈수록 점점 작아진다. 최외각 원뿔의 간격(Δr_n)이 분해능을 결정하게 되는데, 보통 $R = 1.22 \Delta r_n$ 으로 정의된다.

FZP를 이용하여 극자외선을 집속한 후 이를 감광제에 노출

하게 되면 writer로 사용할 수 있다. 이때 집속된 빔의 크기가 writer의 분해능을 결정하게 되는데, 현재까지 보고된 것 중 가장 작은 크기는 82 nm 정도이다. 사용되는 광원이 극자외선 영역이므로 15 nm 정도의 집속된 초점을 얻을 수 있을 것으로 예측되고 있다. 아울러 연엑스선 및 경엑스선 영역으로 파장 영역을 확대하게 되면 10 nm 이하의 집속된 빔을 얻을 것으로 기대되지만 광원의 파장이 짧아지면 FZP를 제작하는데 기술적인 제약이 있다. 즉 zone의 간격이 1 nm에 근접해야 하고, zone의 간격과 높이에 해당하는 aspect ratio가 커야 하는데, 현재의 기술수준으로는 이를 극복하는 데 한계가 있다.

FZP를 이용한 de-magnifying 리소그래피 연구는 그림[Fig. 4]에서 보는 바와 같이 집속광학계에 의하여 광원의 크기가 projection된다는 원리를 이용한 것이다. 광원에 가까운 위치에 object를 두고 FZP를 이용하여 집속하게 되면 object의 형상이 imaging면에 축소되어 패터닝되는 원리이다. 그림[Fig. 4]에서 사용된 object는 Ni mesh로서 7 μm 의 구멍과 12 μm 의 격자로 이루어져 있다. 이를 PMMA에 de-magnifying 리소그래피하였을 경우 370 nm의 구멍이 생기는 것을 관찰하였다. 사용된 FZP의 사양은, 500 μm 의 지름, 200 nm의 최외각 원뿔간격, 초점거리는 2.14 mm이다. 광원은 46.9 nm의 파장을 가지는 극자외선 레이저를 사용하였다. 감광제를 놓는 위치에 따라 패터닝되는 영역을 조절할 수 있는 장점이 있다. 이때 초점에서 멀어질수록 노출시간은 배가된다.

나오는 글

극자외선 간섭을 이용한 나노 패터닝 기술은 위에서 기술한 바와 같이 반도체 산업에서 요구하는 복잡한 구조를 가지는 전자소자의 리소그래피와는 약간 거리가 멀다. 간섭계를 이용하여 패터닝하기 때문에 규칙적인 나노선이나 나노점을 넓은 영역에 패터닝할 수 있는 장점을 가지고 있다. 아울러 현재 차세대 리소그래피 기술로 개발하고 있는 13.4 nm의 극자외선 광원을 사용하여 광원, 감광제, 광학계 등을 사전에 검증할 수 있는 기술이다. 또한 사용되는 광학계 등이 상대적으로 간단하므로 비용적인 측면에서 원천 기술의 개발이 매우 효율적이다. 국내에서는 아직까지 table-top 극자외선 광원을 이용한 연구 성과가 미미한 실정이다. 이러한 극자외선 간섭을 이용한 나노 패터닝 기술 개발이야말로 차세대 리소그래피 기술 개발에 필수적이므로 많은 투자가 이루어져야 할 것이다.

REFERENCES

- [7] M. G. Capeluto *et al.*, Microelectronic Engineering **84**, 721 (2007).
- [8] J. Vila-Comamala *et al.*, Ultramicroscopy **109**, 1360 (2009).